

## بهبود عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای همگرا با استفاده از پروفیل اصلاح شده

عبدالله چراغی

استادیار، مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

تهران، صندوق پستی ۱۳۶-۱۸۷۳۵، amircheraghi62@gmail.com\*

### چکیده

در این مقاله با بررسی رفتار مهاربندهای همگرا، راهکاری جهت بهبود عملکرد آنها ارائه گردیده است. استفاده از مقطع دوپل ناودانی از پرکاربردترین پروفیلها در عضو اصلی مهاربند محسوب شده که به دلیل عدم تقارن محسوس ممان اینرسی و بالطبع نسبت لاغری و شعاع ژیراسیون نسبت به دو محور اصلی، عملاً وقوع کماتش زود هنگام نسبت به محور ضعیفتر موجب رفتار غیر شکل پذیر و از دست رفتن قسمتی از ظرفیت مقطع می‌گردد. همچنین در مرحله طراحی نیز ظرفیت باربری فشاری مجاز مقطع، تابع محور ضعیفتر بوده که موجب غیر اقتصادی شدن آن می‌شود. لذا با توجه به بررسیهای انجام شده بر روی پروفیلهای ناودانی، مقاطع دوپل در سایزهای مختلف به ۲ گروه ضعیفتر نسبت به محور  $X$  و نسبت به محور  $Y$  تقسیم بندی شده و ضعف آنها با افزودن ورق یا پروفیلهای فولادی به منظور یکسان سازی ممان اینرسی نسبت به هر دو محور جبران گردیده است. سپس تأثیر پروفیل اصلاح شده با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از بهبود محسوس عملکرد لرزه‌ای مهاربند داشته به طوری که ظرفیت جذب نیروی فشاری به ترتیب به میزان ۲۵-۱۱ درصد در نمونه‌های مختلف ارتقا یافته است. با توجه به سهولت اجرا و افزایش هزینه نسبتاً پایین به نظر می‌رسد استفاده از روش مذکور می‌تواند جهت بهبود عملکرد مهاربندهای همگرا در دستور کار قرار گیرد.

### واژگان کلیدی

مهاربند هم محور، تقارن ممان اینرسی مقطع، تحلیل استاتیکی غیرخطی، جذب انرژی

## Improving the seismic performance of concentric brace frame using modified profiles

A. Cheraghi

### Abstract

In this paper by surveying the behavior of concentric braced frame, a method to improve their seismic performance is presented. The channel section, is one of the most widely used profiles in the brace that its asymmetric moment of inertia, radius of gyration and slenderness ratio around two main axis, causes buckling around weak axis and non-ductile performance. Also, the criterion of allowable compressive bearing capacity around weaker axis causes uneconomical design process. So, in the first step the double channel sections were divided into 2 groups called weak around X axis and Y axis. Then, their weakness has been compensated by adding steel plate or T shape profile. Finally, the effect of the modified profile was evaluated using nonlinear static analysis by ABAQUS finite element software. Results show a significant improvement in the seismic performance of the brace so that the compressive force absorption capacity is increased by 15-24% in different samples. Due to the ease of implementation and relatively low cost increase, it seems that the use of this method can be used to improve the performance of concentric braces.

### Keywords

Concentric brace frame, Symmetric moment of inertia, Nonlinear static analysis, Energy absorption

مهارندهای هم محور از جمله متداولترین سیستمهای جانبی در کشور ما محسوب شده که به دلیل سختی بسیار بالا و کنترل تغییر مکانها و در عین حال سهولت اجرا به طور گسترده در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر ضعف عمده این نوع مهاربند در عدم رفتار شکل‌پذیر آنها طی بارگذاری لرزه‌ای به واسطه کم‌اندامش زود هنگام عضو فشاری و زوال شدید سختی آنهاست که در تمامی انواع آنها از جمله قطری، ضربدری و شورون به عنوان نقطه ضعف اصلی شناخته می‌شود. لذا همواره تحقیقات فراوانی بر روی رفتار لرزه‌ای و ارائه راهکارهایی جهت بهبود عملکرد این گونه مهاربندها انجام گرفته است.

Trutalli و همکارانش [۱] با انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی روی مهاربندهای ضربدری به بررسی پارامترهای مهم نظیر لاغری در تعیین رفتار چرخه‌ای آنها پرداخته و سختی جانبی پس از کم‌اندامش و ظرفیت اتلاف انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین تحقیقات زیادی بر روی ارائه مدل‌هایی جهت پیش‌بینی اثرات خستگی در چرخه‌های بارگذاری کم روی مهاربندهای همگرا انجام گردیده که از آن جمله می‌توان به تحقیقات Davaran و Easazadeh Far [۲] اشاره کرد که تطابق خوبی با تحقیقات آزمایشگاهی داشته و تخمین نسبتاً دقیق محل و مکانیزم شکست از مزایای آن است.

اتصالات تیر به ستون یکی از موارد تأثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای مهاربندهای همگراست که در طراحی و اجرا باید مورد توجه قرار گیرد. Silva و همکارانش [۳] نحوه مدل‌سازی اتصال مهاربند به قاب و اثر آن روی رفتار سازه را جهت تخمین رفتار لرزه‌ای دقیق بررسی نمودند. در تحقیق دیگر Mohsenzadeh و Wiebe [۴] تأثیر گیرداری اتصال تیر به ستون روی رفتار مهاربندهای همگرای ویژه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق حاکی از تأثیر مثبت گیرداری اتصال به عنوان یک ظرفیت اضافه در سازه جهت کاهش احتمال تخریب کلی آن است. لازم به ذکر است که اندرکنش میانقاب بنایی و مهاربندها نیز از عوامل بسیار تأثیرگذار بر روی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهاست. تحقیقات Ahmady و همکارانش [۵] حاکی از آنست که گرچه لحاظ اندرکنش میانقاب و مهاربند سبب افزایش زیاد سختی جانبی و ظرفیت باربری می‌گردد، لیکن افزایش تقاضای شکل‌پذیری و احتمال وقوع ترک در اتصالات از نتایج منفی آن می‌باشد.

استفاده از فیوزهای شکل‌پذیر به عنوان یک راهکار موثر جهت بهبود عملکرد مهاربندهای همگرا نیز توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته و پیشنهادات زیادی نیز ارائه شده است. به عنوان مثال Bastami و Ahmadi Jazani [۶] استفاده از ورق نازک فولادی در صفحه اتصال میانی مهاربندهای ضربدری جهت افزایش ظرفیت جذب انرژی و جلوگیری از آسیب در سایر قسمت‌های مهاربند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تست‌های آزمایشگاهی حاکی از عملکرد مناسب و جلوگیری از کاهش سختی مهاربند طی چرخه‌های بارگذاری است. همچنین Tirca و همکارانش [۷] تحقیقات زیادی بر روی اصلاح رفتار مهاربند همگرا با استفاده از اتصالات مفصلی خاصی انجام دادند. نتایج حاکی از بهبود عملکرد لرزه‌ای مهاربند با تکیه بر تمرکز مفاصل پلاستیک در اتصالات و الاستیک ماندن رفتار عضو اصلی مهاربند داشت. Cheraghi و Zahrai ایده استفاده از صفحات اتصال سوراخ‌دار در این مهاربندها را ارائه نمودند. نتایج تحقیقات عددی موید بهبود عملکرد مهاربند و افزایش میرایی معادل سازه است [۸]. همچنین آنها ایده استفاده از نبشی فولادی در ترکیب با مهاربند شکافدار را پیشنهاد دادند [۹].

علاوه بر این ایده‌هایی مبتنی بر ترکیب کنترل‌های غیرفعال از جمله میراگر ویسکوز و مهاربندهای همگرا جهت بهبود عملکرد آنها ارائه گردیده که نتایج حاکی از بهبود محسوس عملکرد مهاربندها و شکل‌پذیری بیشتر رفتار آنهاست [۱۰]. تحقیقاتی از این دست جهت ارزیابی دقیق‌تر پارامترهای لرزه‌ای و تلاش جهت بهبود عملکرد مهاربندهای همگرا همواره در حال توسعه بوده و در این مقاله نیز مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲- معرفی موضوع تحقیق

کم‌اندامش مهاربندهای همگرا تحت نیروهای فشاری یکی از مدهای خرابی اصلی این نوع سیستم باربر جانبی محسوب شده که موجب افت عملکرد لرزه‌ای و کاهش شکل‌پذیری آن می‌شود. فارغ از تأثیر سخت‌کنندگی دیوارهای بنایی و با توجه به عدم تقارن مشخصات هندسی حول ۲ محور اصلی مقاطع دویل نبشی یا ناودانی، کم‌اندامش داخل یا خارج از صفحه حول محور ضعیف‌تر قابل مشاهده خواهد بود. به عنوان مثال با بررسی مقاطع دویل ناودانی مورد استفاده در مهاربندها در سازه‌های مختلف، عدم تقارن ممان اینرسی نسبت به دو محور اصلی (و بالطبع شعاع ژیراسیون و نسبت لاغری) به عنوان یک اصل کلی تقریباً در تمام آنها مشهود است. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌گردد تا مقطع دویل سایز ۱۲ ممان



خواهیم داشت:

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (1)$$

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \text{ or } \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{اگر} \rightarrow \quad (2)$$

$$F_{cr} = \left[ 0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y$$

$$\frac{F_y}{F_e} > 2.25 \text{ or } \frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{اگر} \rightarrow \quad (3)$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (4)$$

جدول ۲- ظرفیت فشاری طراحی ۲ مقطع مورد نظر

مقطع	ظرفیت فشاری $F_x$ (ton)	ظرفیت فشاری $F_y$ (ton)	$F_x/F_y$
2UNP10	۱۵	۱۷/۴۶	۰/۸۶
2UNP20	۹۶/۴	۸۱/۲	۱/۱۹

همانطور که مشاهده می‌شود ظرفیت فشاری مقطع نسبت به دو محور اصلی دارای اختلاف نسبتاً زیادی بوده که با توجه به ملاک عمل قرار گرفتن محور ضعیف‌تر، موجب غیراقتصادی شدن طراحی می‌گردد.

#### ۴- روش تحقیق

در این تحقیق ۴ نمونه مهاربند با پروفیل دابل ناودانی نمره ۸ و ۱۰ به عنوان نماینده مقاطع با ممان اینرسی غالب نسبت به محور  $Y$  و پروفیل‌های دابل ناودانی نمره ۱۶ و ۲۰ به عنوان مقاطع با ممان اینرسی غالب نسبت به محور  $X$  مورد بررسی قرار گرفت. جهت یکسان‌سازی ممان اینرسی نسبت به هر دو محور اصلی، امکان استفاده از انواع تسمه و پروفیل‌های فولادی میسر است. لذا در نمونه ۱ از تسمه فولادی روی بال پروفیل استفاده شد و در سایر نمونه‌ها به دلیل استفاده از حداقل فولاد مورد نیاز و در عین حال امکان مونتاژ و جوشکاری آسان‌تر، نیم‌رخ سپری به شرح جدول (۳) مورد استفاده قرار گرفت. در مقاطع دارای  $I_y$  غالب، سپری فولادی روی بال مقطع جهت افزایش بیشتر  $I_x$  و در مقاطع دارای  $I_x$  غالب از پروفیل تقویتی بر روی جان مقطع جهت افزایش بیشتر  $I_y$  استفاده گردید (شکل (۱)). سپس با

اینرسی مقطع حول محور  $Y$  غالب بوده و لذا کمناش داخل صفحه مهاربند محتمل‌تر می‌باشد. اما در مورد سازه‌های بالاتر عملاً به دلیل افزایش ممان اینرسی مقطع نسبت به محور  $X$ ، احتمال کمناش خارج از صفحه بیشتر است. عدم تقارن حدود ۴۷-۱۶ درصدی در ممان غالب مقطع مخصوصاً در سازه‌های بالا و بلا استفاده ماندن بخش عمده‌ای از ظرفیت آن، لزوم توجه به اتخاذ راهکارهایی جهت تقارن ممان اینرسی مقطع را ضروری می‌نماید، زیرا عملاً وقوع کمناش زود هنگام نسبت به محور ضعیف‌تر موجب رفتار غیرشکل‌پذیر و از دست رفتن قسمتی از ظرفیت مقطع می‌گردد. علاوه بر این لحاظ ظرفیت باربری فشاری مقطع متأثر از مشخصات هندسی محور ضعیف‌تر موجب غیراقتصادی شدن طراحی می‌گردد.

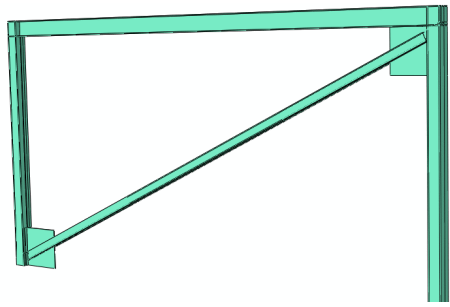
جدول ۱- مقایسه ممان اینرسی مقاطع دابل ناودانی

مقطع	ممان اینرسی مقطع دابل $I_x$ ( $\text{cm}^4$ )	ممان اینرسی مقطع دابل $I_y$ ( $\text{cm}^4$ )	$I_x/I_y$
2UNP8	۲۱۲	۳۱۶	۰/۶۷
2UNP10	۴۱۲	۴۸۰	۰/۸۶
2UNP12	۷۲۸	۷۴۵	۰/۹۸
2UNP14	۱۲۱۰	۱۰۴۶	۱/۱۶
2UNP16	۱۸۵۰	۱۴۴۹	۱/۲۸
2UNP18	۲۷۰۰	۱۹۷۲	۱/۳۷
2UNP20	۳۸۲۰	۲۶۰۷	۱/۴۷

لازم به ذکر است که اعداد جدول با فرض دابل ناودانی به صورت مقطع مرکب قوطی شکل و ۱ سانتیمتر فاصله جهت شبیه‌سازی ورق اتصال میانی در مهاربندها محاسبه شده است.

#### ۳- مقایسه عددی

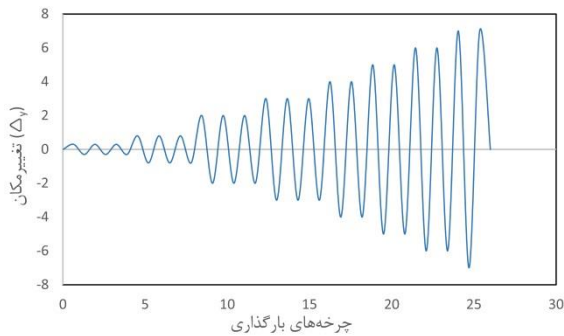
در ادامه با ارائه یک مثال جهت مقایسه عددی ظرفیت باربری فشاری، نقص عملکرد مهاربندها به واسطه عدم تقارن ممان اینرسی مقطع مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ابتدا ظرفیت فشاری مقطع دابل ناودانی ۱۰ به عنوان مقطع با  $I_y$  غالب و سپس مقطع دابل ناودانی ۲۰ به عنوان مقطع با  $I_x$  غالب محاسبه و با هم مقایسه شد. (فولاد ST37 و طول عضو ۶/۷ متر) با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ای [۱۱] و جاگذاری خصوصیات مقاطع فوق‌الذکر در فرمولهای زیر در روش ضرایب بار و مقاومت مطابق جدول (۲) متأثر از طول آزاد مهاربند



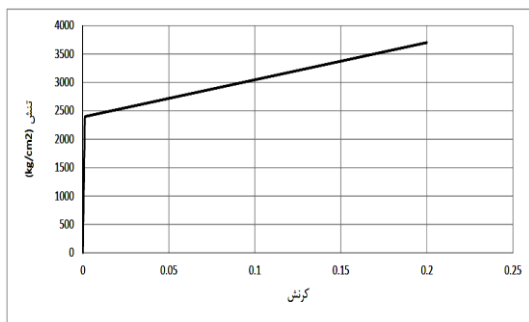
شکل ۲- قاب مدل سازی شده

جدول ۴- ابعاد و محل اتصال ورق تقویت بر روی نمونه‌ها

مقطع تیر	IPE 18
مقطع ستون	BOX15×15×1
ارتفاع قاب	۳۰۰
طول دهانه قاب	۶۰۰



شکل ۳- بارگذاری پیشنهادی ATC-24 [۱۳]



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش فولاد بکار رفته در تحلیل

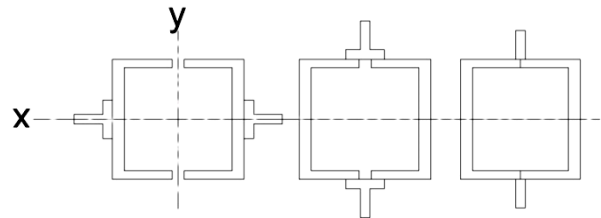
### ۶- سنجش صحت مدل عددی

جهت بررسی صحت نتایج و اطمینان از تطبیق مشخصات و پارامترهای بکار رفته در مدل عددی با شرایط واقعی، در ابتدا یک مدل ساخته شده در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای به شرح مرجع [۱۴]، توسط نرم‌افزار آباکوس مدل سازی و نتایج

استفاده از روش اجزای محدود به بررسی عملکرد نمونه‌ها پرداخته شد.

جدول ۳- ابعاد و محل اتصال ورق تقویت بر روی نمونه‌ها

نمونه‌ها	مقطع مهاربند	پروفیل تقویتی (mm)	محل تقویت
نمونه ۱	2UNP8	-	-
نمونه ۲	2UNP8	PL20×3	بال پروفیل
نمونه ۳	2UNP10	-	-
نمونه ۴	2UNP10	T20	بال پروفیل
نمونه ۵	2UNP16	-	-
نمونه ۶	2UNP16	T30	جان پروفیل
نمونه ۷	2UNP20	-	-
نمونه ۸	2UNP20	T40	جان پروفیل



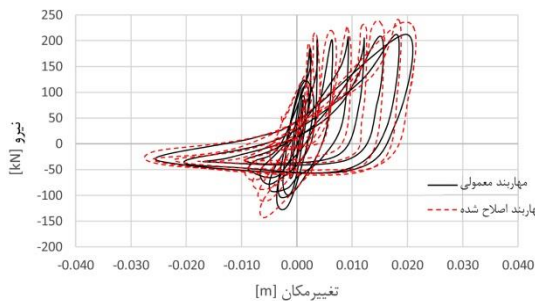
شکل ۱- موقعیت تسمه و سپری تقویتی روی نمونه‌ها

### ۵- شرح روش اجزای محدود

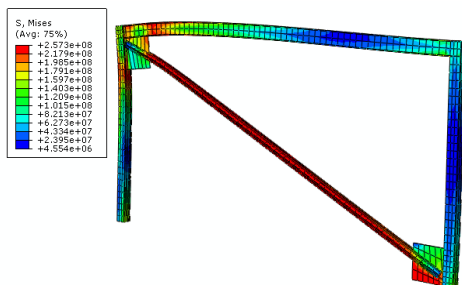
در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس [۱۲] و انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی مدل سه بعدی قاب یک طبقه یک دهانه (شکل ۲)) با مشخصات مندرج در جدول (۴) به بررسی رفتار مهاربند قطری اصلاح شده پرداخته شد. المان مورد استفاده از نوع SOLID بوده و تحلیل با لحاظ اثر تغییر شکل‌های بزرگ انجام گردید. جهت انجام آنالیزهای استاتیکی غیرخطی از الگوی تغییرمکان افزاینده در گام‌های زمانی ۰/۱ ثانیه استفاده و نهایتاً منحنی‌های هیستریزس قاب ترسیم گردید. الگوی بارگذاری نیز تقریباً مطابق با بارگذاری عملی به روش کنترل تغییرمکان بر طبق پیشنهاد ATC-24 انجام شد [۱۳] که بر طبق آن چرخه‌های بارگذاری روی نمونه‌های آزمایشگاهی بر مبنای ۰/۱۲۵-۰/۵-۱-۲-۳ برابر تغییر مکان تسلیم در سه سیکل و بیشتر از آن تا تغییرمکان ماکزیمم در ۲ سیکل انجام می‌گردد (شکل ۳)). فولاد بکار رفته از نوع ST37 و منحنی تنش-کرنش آن به صورت دوخطی و مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شد.

جدول ۵- مقایسه حداکثر نیروی کششی و فشاری

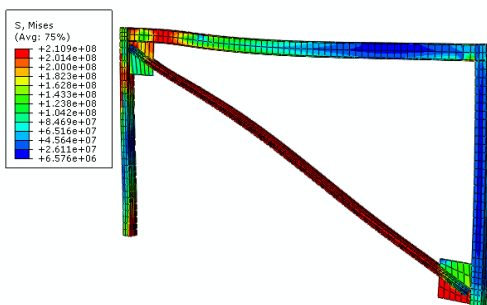
مقطع	نیروی فشاری حداکثر (ton)	نسبت	نیروی کششی حداکثر (ton)	نسبت
2UNP8	۱۱/۸۲	۱/۱۱	۱۷/۰۵	۱/۱۳
	۱۳/۰۸		۱۹/۳۲	
2UNP10	۱۲/۸۶	۱/۱۴	۲۱/۳۵	۱/۱۵
	۱۴/۶۷		۲۴/۵۲	
2UNP16	۶۷/۶	۱/۱۶	۱۰۰/۶۲	۱/۱۲
	۷۸/۱۵		۱۱۲/۳۴	
2UNP20	۹۵/۶	۱/۲۵	۱۴۹/۵۵	۱/۱۳
	۱۱۹/۳۲		۱۶۹/۱۲	



شکل ۵- مقایسه منحنی هیستریزس 2UNP10

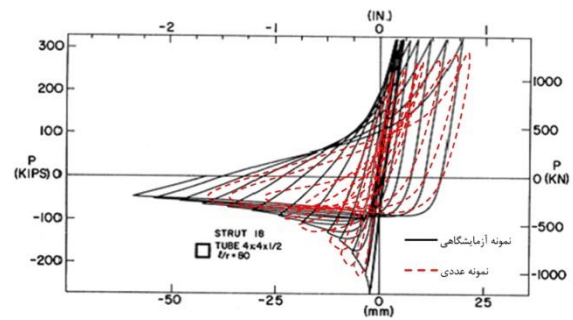


شکل ۶- تنش فون میسز در نمونه 2UNP10 معمولی



شکل ۷- تنش فون میسز در نمونه 2UNP10 تقویت شده

بدست آمده از نرم افزار با نتایج حاصل از تست های آزمایشگاهی مقایسه گردید. ارزیابی منحنی های هیستریزس بدست آمده از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی گویای تطبیق مناسب نتایج بوده و تفاوت موجود نیز حاصل از شرایط بارگذاری و نیز جزئیات مدل سازی از جمله عدم مدل سازی جوش اتصال و نظایر آن می باشد (شکل ۵)).



شکل ۶- مقایسه منحنی هیستریزس نمونه عددی و آزمایشگاهی

## ۷- بررسی نتایج تحلیل

نتایج تحلیل مندرج در جدول (۵) گویای تأثیر محسوس روش پیشنهادی در بهبود عملکرد مهاربندها است که البته از ابتدا نیز به دلیل یکسان سازی ممان اینرسی مقطع نسبت به دو محور اصلی قابل انتظار بود.

به عنوان نمونه منحنی های هیستریزس پروفیل سایز ۱۰ و ۲۰ معمولی و اصلاح شده نمایش داده شده است. مطابق شکل (۶)، مقایسه منحنی هیستریزس مهاربند سایز ۱۰ مویلد تعویق کماتش و افزایش ظرفیت فشاری از ۱۲/۳۲ تن در تغییر مکان ۰/۴۷ سانتیمتر به ۱۴/۴۷ تن در تغییر مکان حدود ۰/۶۷ سانتیمتر است. همانطور که مشاهده می شود، بروز کماتش تحت نیرو و تغییر مکان بیشتر و در نتیجه حصول چرخه های هیستریزس چاق تر، گویای اتلاف انرژی بیشتر مقطع تقویت شده و عملکرد لرزه ای مناسب تر آن می باشد. نحوه توزیع تنش های فون میسز نیز در اتصالات و عضو اصلی مهاربند در شکل های (۷) و (۸) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود تنش های حداکثر در عضو اصلی مهاربند و صفحات اتصال متمرکز شده و از این حیث، تفاوت محسوسی در نمونه معمولی و اصلاح شده حاصل نگردیده است.

همانطور که در شکل (۹) ملاحظه می شود، مقایسه منحنی های هیستریزس ناودانی ۲۰ نیز حاکی از بهبود رفتار نمونه اصلاح شده بوده و ظرفیت جذب نیروی فشاری از حدود ۹۵ به بیش از ۱۱۹ تن ارتقا یافته است. بالطبع تفاوت محسوس

جدول ۶- آنالیز اقتصادی روش پیشنهادی

نمونه‌ها	وزن مهاربند (kg)	وزن پروفیل تقویتی (kg)	افزایش وزن (%)
2UNP10+PL20×3	۱۱۶	۶/۳	۵/۴
2UNP10+T20	۱۴۲	۹/۹	۷/۰
2UNP16+T30	۲۵۲	۲۳/۶	۹/۴
2UNP20+T40	۳۳۹	۳۹/۴	۱۱/۶

۱- استفاده از تسمه یا پروفیل تقویتی سبب افزایش ظرفیت جذب انرژی و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر مهاربند می‌شود. در حالی که در حالت مشابه فاقد تقویت، رفتار غیرشکل‌پذیر و کم‌انرژی‌تر زود هنگام مخصوصاً در دهانه‌های بلند و مقاطع لاغر که از کم‌انرژی‌ترین تبعیت می‌کنند قابل انتظار بوده و بسیاری از ظرفیت مقطع عملاً بدون استفاده باقی خواهد ماند.

۲- یکسان‌سازی ظرفیت کمانشی حول هر دو محور اصلی سبب بهبود محسوس عملکرد مهاربند و نیز اقتصادی‌تر شدن طراحی می‌گردد. ارتقای حدود ۱۱-۲۵ درصدی در نیروی فشاری حداکثر، گویای تأثیر محسوس روش پیشنهادی است.

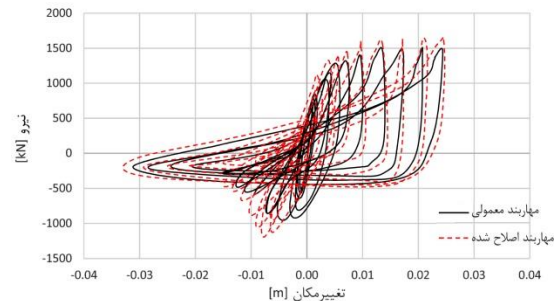
۳- روش بهسازی ارائه شده کاملاً کاربردی بوده و با صرف هزینه نسبی کم در انواع مهاربندهای ضربدری، قطری و شورون قابل اجرا است.

در پایان با توجه به نتایج به دست آمده برای مقطع ناودانی به نظر می‌رسد به دلیل ضعف مشهود عدم تقارن در سایر نیمرخ‌های فولادی دوبل مورد استفاده در مهاربندها، روش پیشنهادی به طور مشابه برای نبشی‌ها نیز قابل اجرا خواهد بود.

#### ۱۰- مراجع

- [1] Trutalli, D., Destefani, L., Marchi, L. and Scotta, R. (2019), "Seismic capacity of steel frames braced with cross-concentric rectangular plates: Non-linear analyses", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 161, pp. 128-136.
- [2] Davaran, A. and Easazadeh Far, N. (2009), "An inelastic model for low cycle fatigue prediction in steel braces", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 523-530.
- [3] Silva, A., Castro, J.M. and Monteiro, R. (2020), "Brace-to-frame connection modelling effects on seismic loss assessment of steel concentrically-braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 172, pp. 106230.
- [4] Mohsenzadeh, V. and Wiebe, L. (2018), "Effect of beam-

مشخصات مقطع نسبت به ۲ محور اصلی سبب هدر رفتن بخشی از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بوده که با جبران آن در نمونه تقویت شده اصلاح گردیده است. همچنین با توجه به افزایش سطح مقطع نهایی پروفیل، میزان جذب نیرو تحت کشش نیز حدود ۱۳ درصد افزایش یافته است.



شکل ۹- مقایسه منحنی هیستریزیس 2UNP20

#### ۸- آنالیز اقتصادی

با مقایسه نتایج ارائه شده در قسمت قبل، افزایش ظرفیت جذب انرژی مهاربند اصلاح شده کاملاً مشهود است. لذا با توجه به سهولت مراحل نصب و جوشکاری پروفیل تقویتی روی بال یا جان مهاربند، در این قسمت به آنالیز اقتصادی این روش پرداخته شده است.

همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، نصب تسمه یا سپری تقویتی روی مهاربند دوبل ناودانی ۸، ۱۰، ۱۶ و ۲۰ به ترتیب موجب افزایش حدود ۵/۴، ۷، ۹/۴ و ۱۱/۶ درصدی در وزن عضو اصلی مهاربند شده، در حالی که میزان افزایش ظرفیت جذب نیروی فشاری مطابق جدول (۵) به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۴، ۱۶ و ۲۵ درصد ارتقا یافته است. لذا به دلیل سهولت نسبی اجرای روش پیشنهادی و با لحاظ هزینه‌های مربوط به تهیه مصالح و جوشکاری ورق یا پروفیل‌های تقویتی نیز به نظر می‌رسد استفاده از این روش کاملاً اجرایی و اقتصادی خواهد بود.

#### ۹- نتیجه گیری

عدم تساوی ظرفیت کمانشی مهاربندها از نقاط ضعف عمده اینگونه سیستم‌های باربر جانبی است که موجب افت شدید مقاومت و عدم تأمین شکل‌پذیری لازم تحت چرخه‌های بارگذاری می‌گردد. نتایج تحقیق را می‌توان در قالب زیر طبقه بندی نمود:

- column connection fixity and gravity framing on the seismic collapse risk of special concentrically braced frames", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 115, pp. 685-697.
- [5] Ahmady, R., Hajirasouliha, I. and Farshchi, H.R. (2013), "Influence of masonry infill on the seismic performance of concentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 88, pp. 150-163
- [6] Bastami, M. and Ahmadi Jazani, R. (2019), "Development of centrally fused braced frame (CFBF) for seismic regions", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 127, pp.105856.
- [7] Tirca, L., Danila, N. and Caprarelli, C. (2014), "Numerical modelling of dissipative pin devices for brace-column connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 94, pp. 137-149.
- [۸] چراغی، ع. و زهرایی، س.م. (۱۳۹۵)، "افزایش استهلاک انرژی در مهاربند همگرا با استفاده از صفحه اتصال سوراخدار"، *مجله علمی پژوهشی امیرکبیر*، دوره ۴۸، شماره ۳، ص. ۳۵۱-۳۴۱.
- [۹] زهرایی، س.م. و چراغی، ع. (۱۳۹۵)، "افزودن نبشی فولادی به مهاربند شکافدار برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرا"، *مجله علمی پژوهشی عمران مدرس*، دوره ۱۶، شماره ۳، ص. ۹۷-۸۷.
- [10] Dicleli, M. and Mehta, A. (2007), "Seismic performance of chevron braced steel frames with and without viscous fluid dampers as a function of ground motion and damper characteristics", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 1102-1115.
- [۱۱] دفتر مقررات ملی ساختمان، ۱۴۰۱ طرح و اجرای ساختمانهای فولادی، ویرایش پنجم، انتشارات توسعه ایران، تهران.
- [12] ABAQUS Finite Element Analysis Program, Version 6.10.0. User's Manual, 2010.
- [13] Applied Technology Council, (1992), Guidelines for seismic testing of components of steel structures, Report of ATC-24.
- [14] Black, G.R., Wenger, B.A. and Popov, E.P. (1980), "Inelastic buckling of steel strut under cyclic load reversals", Tech. Rep. UCB/EERC-80-40, EERC, Berkeley, CA.